

Научная статья

УДК 621.391

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-1-27-35>

EDN:FPCLJZ



Моделирование процесса распространения сенсорных данных в информационно-ориентированной сети ICN

✉ Яна Александровна Батыршина, yana.borovskaya.98@mail.ru

Александр Юрьевич Гребешков, a.grebeshkov@psuti.ru

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Самара, 443010, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность Информационно-ориентированная сеть ICN является перспективной концепцией для описания и моделирования современных инфотелекоммуникаций, где информационное взаимодействие рассматривается как условно независимое от применяемых телекоммуникационных технологий и осуществляется на основе именованных объектов данных. В цифровых системах Индустрии 4.0, включая системы Интернета вещей, требуется обеспечить оперативное ситуационное информирование в масштабах сети взаимодействующих объектов путем распространения существенной информации. Вследствие этого возникает задача анализа общей динамики распространения сенсорной информации в форме актуальных данных в процессе обработки сведений на узлах ICN. Актуальный статус данных обеспечивает эффективное принятие решений по управлению объектами и информационными потоками. Для повышения быстродействия сенсорные данные размещаются в семантической кэш-памяти узлов сети ICN. В работе представлен подход к исследованию процесса распространения актуальных данных в ICN на основе информационной диффузии посредством детерминированных моделей, основанных на имитации эпидемии. Получение данных с актуальным статусом о значимом событии от исходного узла рассматривается как аналог процесса условного заражения узлов ICN. Такой подход позволяет оценить темп обновления узлами ICN информации от актуального источника и обеспечить принятие решений по управлению на основе обмена оперативными знаниями в виде сенсорной информации.

Цель исследования: повышение эффективности управления информационными потоками в сети ICN при распространении сенсорных данных.

Методы: аналитический обзор научных публикаций, численные методы, имитационное моделирование.

Решение: разработана аналитическая модель распространения данных с актуальным статусом в сети ICN на основе системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих диффузионные процессы SIR-модели. Представлены результаты независимого дискретно-событийного моделирования распространения сенсорных данных ICN в симуляторе ns-3. Алгоритм моделирования основан на применении детерминированной модели эпидемий.

Новизна работы определяется предложенным авторами подходом к анализу и отображению динамики распространения контента в сети ICN, для значимого (актуального) события, и оценки максимального темпа распространения данных с актуальным статусом.

Практическая значимость заключается в получении оценки интенсивности изменения ситуационной осведомленности в сенсорных сетях при распространении актуальной информации.

Ключевые слова: актуальный статус данных, информационно-ориентированная сеть, информационная диффузия, моделирование сетей связи

Ссылка для цитирования: Батыршина Я.А., Гребешков А.Ю. Моделирование процесса распространения сенсорных данных в информационно-ориентированной сети ICN // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 1. С. 27–35. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-1-27-35. EDN:FPCLJZ

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-1-27-35>

EDN:FPCLJZ

Modeling of the Process of Sensory Data Dissemination in the Information-Centric Network ICN

Yana A. Batyrshina✉, yana.borovskaya.98@mail.ru

Alexandr Yu. Grebeshkov, a.grebeshkov@psuti.ru

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics,
Samara, 443010, Russian Federation

Annotation

The relevance The Information-Centric Network (ICN) is a promising concept for describing and modeling modern information and telecommunications. In an ICN, information interaction is considered conditionally independent of the telecommunications technologies used, and it is carried out on the basis of named data objects. In Industry 4.0 digital systems, including the Internet of Things, rapid situational awareness across a network of interacting objects requires disseminating essential information. It is necessary to objectively analyze the overall dynamics of sensor information distribution in the form of up-to-date data during information processing at ICN nodes. The current status of the data enables effective decision-making regarding the management of objects and information flows. To increase speed, sensor data is stored in the semantic cache memory of ICN network nodes. This paper presents an approach to studying the distribution of up-to-date data in ICNs based on information diffusion using deterministic models based on epidemic simulation. Obtaining data on the current status of a significant event from the source node is analogous to the conditional infection of ICN nodes. This approach enables us to estimate the rate at which ICN nodes update information from the current source and make management decisions based on the exchange of operational knowledge in the form of sensor information.

The aim of this study: improving the efficiency of information flow control in the ICN network for the propagation of sensor data.

Methods: analytical review of scientific publications, numerical methods, simulation modeling.

Solution: An analytical model of data propagation with topical status in the ICN network was developed based on a system of nonlinear ordinary differential equations that describe the diffusion processes of the SIR model. The results of the independent discrete-event modeling of the propagation of ICN sensor data in the ns-3 simulator are presented. The modeling algorithm is based on applying a deterministic epidemic model.

Scientific novelty lies in the authors' proposed approach to analyzing and displaying the dynamics of content distribution in an ICN network during a significant event, as well as estimating the maximum distribution rate of topical data.

The practical significance consists of assessing the intensity of changes in situational awareness in sensory networks when topical information is disseminated.

Keywords: topical data status, information-centric network, information diffusion, communication network modeling

For citation: Batyrshina Ya.A., Grebeshkov A.Yu. Modeling of the Process of Sensory Data Dissemination in the Information-Centric Network ICN. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(1):27–35. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-1-27-35. EDN:FPCLJZ

Введение

В рамках обеспечения работы систем цифрового производства Индустрии 4.0 на основе систем Интернета вещей (IoT, аббр. от англ. Internet of Things)

разнородные датчики и сенсоры постоянно формируют сенсорные данные, которые передаются с помощью различных телекоммуникационных технологий в масштабах сенсорных сетей.

Определенный тип данных можно рассматривать как критичные относительно их статуса и обозначить как актуальные в процессе управления информационными потоками сенсорных систем [1]. Это объективно приводит к необходимости исследования динамики распространения в сети вновь полученных или обновленных данных с актуальным статусом для обеспечения единого ситуационного информирования.

В работе для описания информационной инфраструктуры распространения и обработки сенсорных данных используется информационно-ориентированная сеть (ICN, аббр. от англ. Information-Centric Network) [2] для предметной области IoT. ICN здесь рассматривается как виртуализированная интеллектуальная сеть связи обработки сенсорных данных с распределенной ИТ-архитектурой, которая не зависит от используемых сетевых технологий и относится к уровню приложений (рисунок 1).

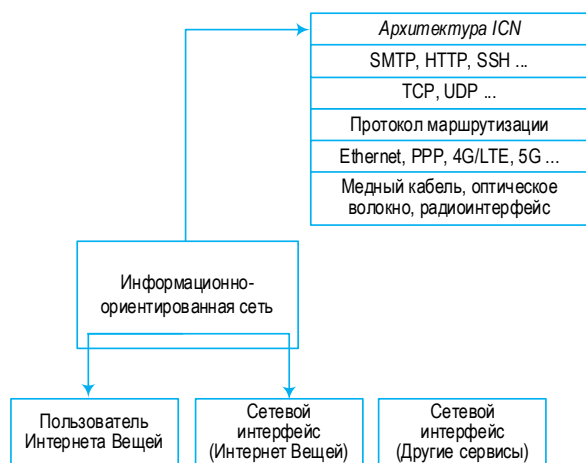


Рис. 1. Интеграция концепции ICN в системы IoT

Fig. 1. Integration of the ICN Concept into IoT Systems

Под ICN [3] понимается такая структура организации сетевого взаимодействия, где происходит разделение плоскости данных и плоскости управления, а любой узел в сети имеет свою внутреннюю информационную кэш-память, которая может быть виртуализирована по принципу программно-определяемой сети (SDN, аббр. от англ. Software-Defined Networking) [4]. Архитектура сети ICN позволяет автоматически кэшировать контент в любом месте физической сети, независимо от приложений конечного пользователя систем IoT благодаря различным схемам именования [5, 6] и распределенной обработке данных. Под контентом понимаются предметно-ориентированные данные по сферам применения IoT. Следует отметить, что концепция ICN является результатом развития концепции сетей именованных данных (NDN, аббр. от англ. Named Data Network) [7], и во многом аналогична концепции сети доставки контента (CDN, аббр. от англ. Content Delivery Network).

Перечисленные виртуальные сети имеют общую базовую технику обработки данных путем переадресации запроса пользователя для предоставления информации к ближайшему доступному кэширующему контент-узлу, в том числе к контент-серверу. Принципиальное отличие концепций построения CDN и ICN заключается в способе обращения к данным. В сети CDN адресация и обращение к данным основано на IP-протоколе, где пользователю для получения информации предварительно необходимо знать IP-адрес, например веб-страницы с помощью DNS-сервера.

В ICN применяется более высокий уровень абстракции описания доступа к данным, для чего вводится термин именованного объекта данных (NDO, аббр. от англ. Named Data Object). NDO имеет имя, не связанное с устройством (сервером, на котором находится информация). Соответственно при запросе информации пользователь не знает, на каком физическом узле находятся сведения.

Задача исследования состоит в моделировании процессов обновления данных в информационной кэш-памяти узлов ICN в предположении, что первоначально актуальные данные получил один узел IoT, рассматриваемый как первичный источник. Далее эти сведения распространяются по доступным узлам ICN с обновлением информационной кэш-памяти. Биологическим аналогом такого процесса является эпидемическое заражение популяции от «нулевого» пациента, т. е. первичного источника контента. Кроме того, важно учитывать смысл актуальной информации, что важно для принятия решений по управлению в условиях применения средств машинного обучения, в том числе для предиктивного менеджмента.

На рисунке 2 приведена концептуальная схема ICN, которая показывает общую схему обработки информации применительно к системе IoT, а также состав базовой информации управления любого узла ICN [8–10].

В сетях ICN при запросе и последующем переносе данных используется два типа информационных пакетов. Первый тип представляет собой пакет с описанием данных, интересующих пользователя (Interest Packet). Второй тип – пакет данных (Data Packet), который отправляется пользователю по запросу.

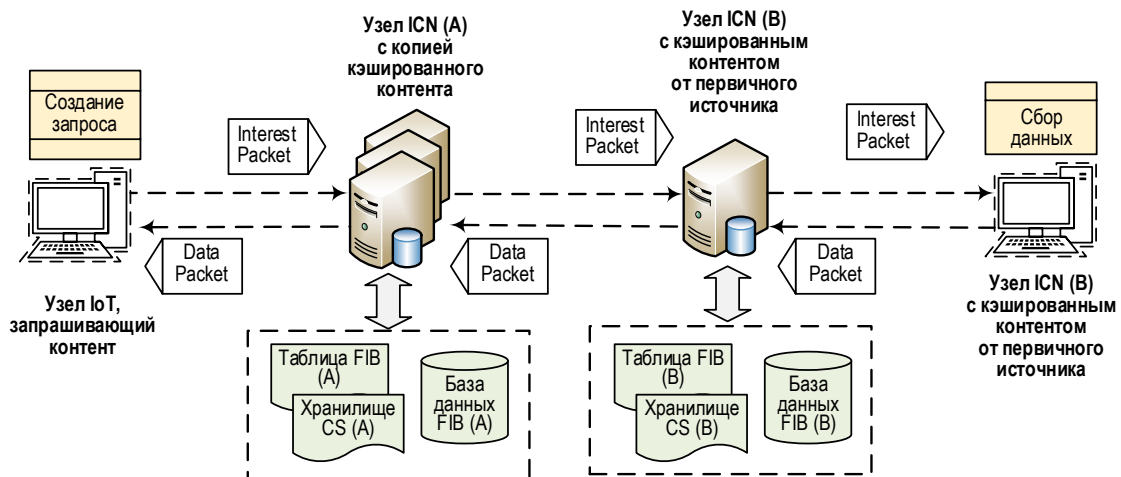


Рис. 2. Концепция построения информационно-ориентированной сети ICN для IoT

Fig. 2. The Concept of Constructing an Information-Centric Network ICN for Internet of Thing

В результате каждый узел ICN поддерживает 3 информационные таблицы [11]:

- локальное хранилище контента (CS, аббр. от англ. Content Store) или кэш-хранилище, которое выступает в роли временного хранилища данных, содержащихся в Data Packet;
- база пересылки информации (FIB, аббр. от англ. Forwarding Information Base), которая хранит маршрут переноса пакетов данных в ответ на Interest Packet;
- таблица ожидаемых интересов (предпочтений) пользователя (PIT, аббр. от англ. Pending Interest Table), которая хранит вероятные источники запрашиваемого контента в виде Data Packet.

Пусть узел ICN (A) способом кэширования информации содержит копию актуального контента, который ранее был получен от узла ICN (B). В свою очередь, узел ICN (B) по подписке или иным способом оперативно обновляет контент при изменениях на узле IoT – первичном источнике контента. Узел IoT, запрашивающий контент, либо не имеет актуального контента, либо на узле необходимо обновить статус данных до актуального. Для этого формируется Interest-запрос с содержимым в виде «Interest Packet». Если узел ICN (A) не обладает актуальными данными в CS, например с точки зрения времени обновления, то Interest-запрос (InP) с «Interest Packet» согласно данным FIB и PIT перенаправляется к узлу ICN (B). При этом узлов ICN (A) в общем случае может быть несколько. В ответ узел ICN (B), база данных которого CS (B) имеет актуальный статус, направляет ответ в виде «Data Packet» (DP) в сторону ICN (A), в результате чего база CS (A) на узле ICN (A) обновляется. Далее с помощью базы FIB требуемый контент достигает узла IoT, запрашивавшего контент. Далее предполагается, что существует режим «по подписке» для автоматической пересылки данных от ICN (B) в ICN (A) по ранее записанным маршрутам FIB при появлении новой

информации на первичном источнике и обновлении контента в CS (B). Следует отметить, что узлы ICN на сети IoT могут быть развернуты на основе шлюзов, а в сети 5G – на основе базовых станций и / или пакетного ядра сети.

Для повышения эффективности управления информационными потоками сенсорных данных при распределении коммуникационных ресурсов ICN далее представлены результаты моделирования процесса распространения и обновления сенсорных данных, имеющих актуальный статус с точки зрения аналитического и имитационного вариантов исследования ICN.

Аналитическое моделирование распределения актуальных данных по узлам сети ICN

В работе актуальной считается либо информация о вновь зарегистрированном значимом событии, либо появление обновленных по месту, времени и семантике данных. Процесс распространения актуальных данных в целом в масштабах сети исследуется с помощью класса диффузионных моделей – информационной диффузии [12]. Информационная диффузия здесь рассматривается как процесс распространения данных с учетом времени на запросы и обновление контента в хранилище CS через узлы-посредники ICN между окончательными узлами.

В составе класса диффузионных моделей выделяют базовые детерминированные эпидемиологические модели. С учетом специфики предметной области исследования и описанной выше логики функционирования ICN сети можно выделить несколько детерминированных моделей эпидемий [13, 14].

В каждой из указанных моделей выделяют ряд состояний, в которые могут переходить N узлов

сети ICN по мере распространения данных с актуальным статусом, а именно:

1) S-состояние – свободный IoT-узел, на который не были переданы данные с запрошенным именем;

2) I-состояние – IoT-узел, на который передача данных с запрошенным именем осуществилась, хранится в информационной кэш-памяти и может быть отправлена узлам-соседям в ответ на Interest-запрос;

3) R-состояние – IoT-узел с «иммунитетом», который получил данные с запрошенным именем, но уже удаливший эти данные из кэш-памяти по тем или иным причинам, например при освобождении кэш-пространства или истечении статуса актуальности информации по таймеру времени.

Исходя из перечисленных состояний, базовыми эпидемиологическими моделями распространения информации ICN можно считать *SI-модель* (аббр. от англ. Susceptible-Infected) – модель «Восприимчивый – Инфицированный»; *SIS-модель* (аббр. от англ. Susceptible-Infected-Susceptible) – модель «Восприимчивый – Инфицированный – Восприимчивый»; *SIR-модель* (аббр. от англ. Susceptible-Infected-Removed) – модель «Восприимчивый – Инфицированный – Выздоровевший».

В SI-модели в момент времени t из общего количества N узлов $S(t)$ обозначает долю свободных IoT-узлов, $I(t)$ – долю IoT-узлов, на которые осуществилась передача данных с запрошенным именем и хранится в информационной кэш-памяти, а параметр λ обозначает скорость переполнения кэш-памяти узла. Тогда будут «заражены» данными с актуальным статусом $\lambda S(t)$ восприимчивых узлов.

SI-модель может быть описана в виде уравнения:

$$\frac{dI(t)}{dt} = \frac{\lambda S(t)I(t)}{N}. \quad (1)$$

В SIS-модели параметры N , $S(t)$, $I(t)$, λ идентичны параметрам в модели SI. Здесь вводится дополнительный параметр γ , который обозначает скорость (интенсивность) распространения контента по узлам сети. $\gamma I(t)$ определяет прирост числа узлов при переходе из состояния I в состояние S в единицу времени:

$$\frac{dI(t)}{dt} = \frac{\lambda S(t)I(t)}{N} - \gamma I(t) \quad \frac{dI(t)}{dt} = \frac{\lambda S(t)I(t)}{N}. \quad (2)$$

Известны работы российских ученых [15–17], в которых исследуются технологии NDN применительно к беспроводным ячеистым сетям, в том числе с использованием эпидемической модели распространения трафика. Применительно к NDN для описания процесса распространения данных рассматривается SIS-модель. В этой модели вероятность события, когда устройство на определенное время сохранит во внутренней кэш-памяти данные с запрашиваемым именем, зависит от

популярности данных, интенсивности передачи трафика в сети, размера кэш-хранилища и плотности рассматриваемого участка сети.

В отличие от приведенных научных результатов, в настоящей работе для аналитического отображения динамики распространения контента, относящегося к значимому (актуальному) событию, и оценки его максимального темпа распространения в ICN используется SIR-модель. Здесь каждый узел ICN может в сколь угодно малый момент времени находиться только в одном из трех состояний – S , I , R . В SIR модели добавляется состояние R , которое позволяет учесть актуальность контента и ограничения на объем кэш-памяти, в том смысле, что неактуальный контент удаляется из кэш-памяти.

Далее формируется система обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = \frac{-\lambda S(t)I(t)}{N} \\ \frac{dI(t)}{dt} = \frac{\lambda S(t)I(t)}{N} - \gamma I(t). \\ \frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t) \end{cases} \quad (3)$$

При решении систем обыкновенных дифференциальных уравнений используются аналитические и численные методы решения. Для (3) аналитический метод решения не подходит, так как данная система является нелинейной и вычисляется с помощью численных методов решения. В работе система (3) была решена классическим методом Рунге – Кутты 4-го порядка. Далее приводятся параметры численного примера расчета системы (3).

Пусть в численном примере расчетов исходные параметры аналитической модели имеют следующие значения:

$\lambda = 3$ (узлов/с),

$\gamma = 1$ (узлов/с),

$N = 1000$ (количество узлов в сети),

$t_0 = 0$ (начальный момент времени, с),

$t_{\text{end}} = 10$ (конечный момент времени, с).

Здесь учитывается, что процесс распространения контента с актуальным статусом информации происходит только тогда, когда в сети есть хотя бы один первичный узел – источник данного контента. Пусть количество свободных узлов, на которые ранее не были переданы данные с запрошенным именем / идентификатором информационного массива, достаточно велико, но ограничено и равно $S = 9999$. Количество узлов, которые хранят данные с запрошенным именем и хранятся в информационном кэше, равно $I = 1$. Количество узлов сети, которые получили данные и были удалены из выборки по той или иной причине, равно $R = 0$.

В целях аналитического представления распределения данных по узлам ICN и ее графического отображения использовалась программа [18], написанная на языке Python 3.12.6 с помощью библиотек numpy – для расчета, matplotlib – для вывода графика и tkinter – для графического интерфейса.

На рисунках 3а, 3б и 3с показаны результаты аналитических расчетов, демонстрирующие динамику распространения контента с актуальными данными в ICN для меняющихся параметров λ и γ .

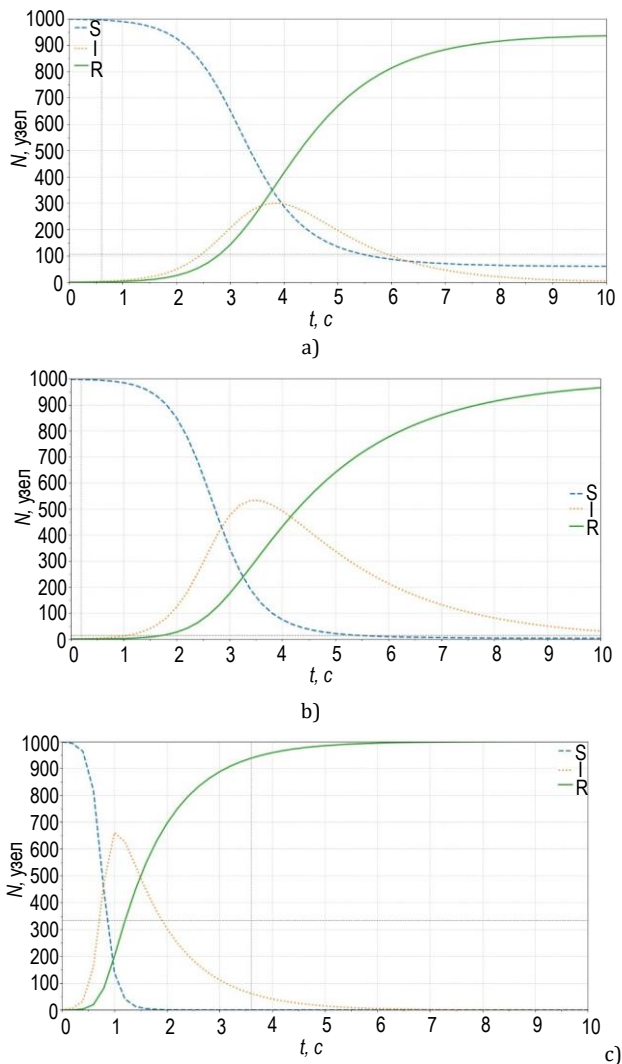


Рис. 3. Результаты аналитических расчетов процесса распространения контента по сети ICN: а) $\lambda = 3$ узла/с, $\gamma = 1$ узел/с; б) $\lambda = 3$ узла/с, $\gamma = 0/5$ узлов/с; в) $\lambda = 10$ узлов/с, $\gamma = 1$ узел/с

Fig. 3. The Results of Analytical Calculations of the Content Distribution Process Across ICN: a) $\lambda = 3$ nodes/s, $\gamma = 1$ nodes/s; б) $\lambda = 3$ nodes/s, $\gamma = 0/5$ nodes/s; в) $\lambda = 10$ nodes/s, $\gamma = 1$ nodes/s (с)

Из рисунков 3б и 3с видно, что по мере увеличения скорости распространения контента (λ) время, необходимое для получения максимального количества узлов с актуальным поименованным содержимым в кэше (I), сокращается. По мере уменьшения скорости заполнения кэша (γ) время,

необходимое для получения максимального количества узлов с актуальным содержимым в кэше (I), также сокращается. При этом время достижения максимального значения количества узлов с актуальным содержимым в кэше (I) совпадает со временем пересечения сигмовидных кривых, описывающих свободные узлы (S), которые не получили информацию в связи с потерей актуальности, и узлы с удаленным содержимым поименованного контента из кэша (R) в результате переполнения и удаления из кэш-памяти потерявшей актуальность информации.

При выполнении серии численных экспериментов доказано, что устойчивость модели распространения контента в сети ICN сохраняется при следующем диапазоне параметров модели – скорость (интенсивность) распространения контента λ может изменяться в пределах от 2 до 35 узлов/с, а при увеличении темпа распространения контента количество «зараженных» узлов растет экспоненциально. Скорость переполнения кэш-памяти γ может изменяться в пределах от 0,2 до 2 узлов/с при заданном числе узлов сети $N = 1000$ и конечном времени моделирования $t_{\text{end}} = 10$ с.

Приведенный численный пример расчетов является обобщенным в том смысле, что не учитывается микросостояние сети ICN, например параметры распространения данных по реальным сетям связи, не рассматривается конкретный протокол обновления данных (MQTT, CoAP и т. д.), а также не делается акцент на конкретной схеме именования сенсорных данных в процессе маршрутизации контента по ICN. Указанные допущения приводят к необходимости проведения независимого дискретно-событийного моделирования процесса обработки и распространения контента в сети ICN.

Имитационное моделирование сети ICN в симуляторе ns-3

В работе в качестве среды для имитационного моделирования был выбран симулятор ns-3 (аббр. от англ. Network Simulator 3) с открытым модулем ndnSIM, который позволяет проводить исследования сетей ICN, моделировать различные схемы именования контента [19]. В работе имитационное моделирование выполнено с использованием языка C++ для реализации симуляции распространения контента. Здесь симуляция основана на пакетах пересылки-получения информации сетей NDN (InP-запрос и DP-пакет) и алгоритма эпидемиологического распространения информации. Язык программирования Python 3 использовался для реализации модуля графического интерфейса, модулей построения и анализа графиков, а также модуля вычисления по данным имитационного моделирования изменяющихся расчетных величин (λ и γ) для объединения и дальнейшего сравнения

графиков аналитических и имитационных результатов моделирования.

В имитационной модели источники информации со множеством сенсорных узлов размещаются случайным образом в прямоугольной области. Все узлы в имитационной модели являются статическими, в качестве модели беспроводной технологии передачи данных в имитационной модели используется стандарт IEEE 802.11x, позволяющий получить максимально возможные значения.

Исходя из логики эпидемиологической маршрутизации, в имитационной модели реализовано, что каждый узел может находиться в одном из трех состояний – S, I, R по аналогии с аналитической моделью. Каждый активный узел ICN периодически инициирует запросы с Interest Packet с определенным временным периодом или интервалом маршрутизации от узла в состоянии S и заданным джиттером. При получении Data Packet узел ICN из состояния S переходит в состояние I . Также задается объем кэш-памяти каждого узла для хранения контента с актуальным статусом данных. Вероятность успешной передачи данных с запрошенным именем зависит от параметров физического уровня и уровня управления доступом к среде и в модели задается определенным значением. Через время по таймеру, равное $1/\nu$, где ν – скорость высвобождения или очищения кэш-памяти узла, узел переходит в состояние R и прекращает рассылку Interest Packet. Стохастичность процесса распространения информации по узлам ICN определяется генератором случайных чисел, задается начальное значение, с которого начинается последовательность псевдослучайных чисел (seed), где разные значения seed определяют различные реализации эпидемиологического процесса распространения информации для более точной оценки имитационной модели при проведении серии испытаний.

В модели ICN узел в состоянии S с помощью внутреннего метода, который регистрирует событие посылки, отправляет Interest Packet с именем вида: /sir/infect/probe/<seq>.

В таблице 1 представлены параметры модели для проведения имитационного моделирования, которые были использованы при реализации процесса распространения информации в ICN сети.

Для сравнения аналитического и имитационного моделирования на рисунке 4 представлен общий график, описывающий как аналитические данные, так и данные, полученные с помощью имитационного моделирования. Здесь кривые S, I, R описывают результаты аналитического моделирования, а кривые S', I', R' – имитационного. В качестве аналитических параметров скорость (интенсивность) распространения контента равна $\lambda = 2,22$ узла/с, а скорость переполнения кэш-памяти – $\gamma = 0,3$ узла/с.

ТАБЛИЦА 1. Параметры имитационной модели распространения информации в сети ICN

TABLE 1. Parameters of the Simulation Model of Information Dissemination in the ICN

№ п/п	Описание параметра имитационного моделирования	Значение параметра
1.	Количество узлов	1000
2.	Радиус связи, м	120
3.	Время симуляции, с	120
4.	Вероятность «заражения» контентом с актуальным статусом данных	0,4
5.	Скорость высвобождения, 1/с	0,15
6.	Интервал маршрутизации InP-запроса от узла в состоянии S , с	1
7.	Джиттер интервала маршрутизации Interest Packet от узла в состоянии S , с	0,01
8.	Время жизни «Interest Packet»	1 с
9.	Начальное количество узлов в состоянии I	1
10.	Объем кэш-памяти каждого узла для хранения контента с актуальным статусом данных	1000000
11.	Вероятность отправки «Data Packet» в ответ на «Interest Packet»	1
12.	Максимальное количество одновременно необработанных «Interest Packet», которое может иметь узел в состоянии S	∞

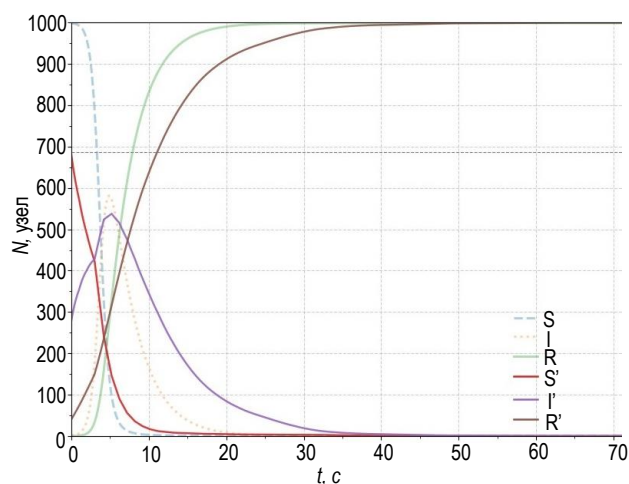


Рис. 4. Результаты сравнения аналитического и имитационного моделирования

Fig. 4. The Results of the Comparison of Analytical and Simulation Modeling

Для оценки степени достоверности разработанной имитационной модели процесса распространения информации по узлам ICN (см. рисунок 4) определена средняя относительная погрешность результатов: $\Delta S = 0,5273\%$; $\Delta I = 0,5514\%$; $\Delta R = 0,3207\%$.

Исходя из значений средней относительной погрешности, можно сделать вывод о том, что при заданных параметрах возможно применение представленного метода на реальных сетях контроля в «умном городе», системы контроля морских течений, систем контроля состояния почвы в «умном» сельском хозяйстве.

Заключение

В результате применения представленной диффузионной модели распространения контента в сетях ICN возможно прогнозировать динамику обновления информационного кэш-пространства для

узлов ICN в сетях IoT. Это позволяет оценить изменение ситуационной осведомленности в IoT в целом, что позволяет повысить производительность и точность системы управления, основанной на осведомленности узлов ICN о критически важном событии, обеспечить информационную взаимосвязанность, достичь единства задач, целей и стратегий управления на основе сенсорных данных с помощью ICN. Предлагаемая диффузионная модель рекомендуется к применению при ограничениях на скорость (темп) распространения контента по крайней мере от 2 до 35 узлов/с. При увеличении темпа распространения контента количество «зараженных» узлов растет экспоненциально. Достоверность диффузионной модели распространения информации по узлам ICN подтверждается малыми значениями средней относительной погрешности параметров сети в сравнении с разработанной имитационной моделью ICN.

Список источников

1. Grebeshkov A.Y., Batyrshina Y.A. Data relevance IoT node cache update inspired by epidemic-based model // Proceedings of the 28th International Conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications (DCCN, Moscow, Russia, 22–26 September 2025). RSCI, 2025. PP. 20–24.
2. Гребешков А.Ю., Боровская Я.А. Построение информационно-ориентированных сетей 5G-ICN // Вестник связи. 2021. № 11. С. 13–18. EDN:IDYVMD
3. Rec. ITU-T Y.3075. Requirements and capabilities of information-centric networking routing and forwarding based on control and user plane separation in IMT-2020. 2020.
4. Serhane O., Yahyaoui K., Nour B., Mouncla H. A Survey of ICN Content Naming and In-network Caching in 5G and Beyond Networks // IEEE Internet of Internet of Things. 2021. Vol. 8. Iss. 6. PP. 4081–4104. DOI:10.1109/JIOT.2020.3022243. EDN:VOZKTY
5. Навроцкий Я.Ю., Пацей Н.В. Особенности именования объектов и сервисов в информационно-ориентированных сетях // II Всероссийская научная конференция с международным участием «Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения» (Тольятти, Российская Федерация, 22–24 апреля 2019). 2019. С. 506–511. EDN:NICCSU
6. Bala Krishna M. User-Centric and Information-Centric Networking and Services Access Networks, Storage and Cloud Perspective. CRC Press, 2019. 310 p. DOI:10.1201/9781315207650
7. Zhang L., Afanasyev A., Burke J., Jacobson V., claffy K.C., Crowley P., et al. Named data networking // ACM SIGCOMM Computer Communication. 2014. Vol. 44. Iss. 3. PP. 66–73. DOI:10.1145/2656877.2656887
8. Bari F., Chowdhury S.R., Ahmed R., Boutaba R., Mathieu B. A survey of naming and routing in information-centric networks // IEEE Communications Magazine. 2012. Vol. 50. Iss. 12. PP. 44–53. DOI:10.1109/MCOM.2012.6384450
9. Xylomenos G., Ververidis C.N., Siris V.A., Fotiou N., Tsilopoulos C., Vasilakos X., Katsaros K.V., Polyzos G.C. A Survey of Information-Centric Networking Research // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2014. Vol. 16. Iss. 2. PP. 1024–1049. DOI:10.1109/SURV.2013.070813.00063
10. Ahlgren B., Dannewitz C., Imbrenda C., Kutscher D., Ohlman B. A survey of information-centric networking // IEEE Communications Magazine. 2012. Vol. 50. Iss. 7. PP. 26–36. DOI:10.1109/MCOM.2012.6231276
11. Subharthi P., Jianli P., Raj J. Architectures for the internet future networks and the next generation: a survey // Computer Communication. 2011. Vol. 34. Iss. 1. PP. 1–63. DOI:10.1016/j.comcom.2010.08.001
12. Li M., Wang X., Gao K., Zhang S. A Survey on Information Diffusion in Online Social Networks: Models and Methods // Information. 2017. Vol. 8. Iss. 4. PP. 1–21. DOI:10.3390/info8040118
13. Mattar C.H., Bou Abdo J.B., Demerjian J.A., Makhoul A. Network Diffusion Algorithms and Simulators in IoT and Space IoT: A Systematic Review // Sensor and Actuator Networks. 2025. Vol. 14. Iss. 2. PP. 1–36. DOI:10.3390/jsan14020027. EDN:QERFOZ
14. Kumar P., Sinha A. Information diffusion modeling and analysis for socially interacting networks // Social Network Analysis and Mining. 2021. Vol. 11. Iss. 1. P. 11. DOI:10.1007/s13278-020-00719-7. EDN:AZBSFG
15. Блинные М.А., Пирмагомедов Р.Я. Сетевой шлюз для сетей именованных данных // Электросвязь. 2021. № 5. С. 22–30. DOI:10.34832/ELSV.2021.18.5.002. EDN:OOIHJJ
16. Блинные М.А., Пирмагомедов Р.Я., Молчанов Д.А., Кучерявый Е.А. Применение технологий именованных данных в беспроводных ячеистых сетях // Электросвязь. 2019. № 11. С. 22–28. EDN:RHQFJM
17. Блинные М.А. Разработка и исследование моделей и методов построения беспроводных ячеистых сетей именованных данных. Автореферат дис. ... канд. тех. наук. СПб.: СПбГУТ, 2022. 23 с. EDN:GWDTVF
18. Батыршина Я.А. Приложение для расчета скорости обновления контента кэш-памяти сенсорных узлов в информационно-ориентированных сетях. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2025660551 от 16.04.2025. Оpubл. 24.04.2025. EDN:VYUKGH

19. Батыршина Я.А., Гребешков А.Ю. Программа моделирования информационно-ориентированной сети ICN. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2025695229 от 26.11.2025. Оpubл. 10.12.2025. EDN:NPEPPJ

References


1. Grebeshkov A.Y., Baturshina Y.A. Data relevance IoT node cache update inspired by epidemic-based model. *Proceedings of the 28th International Conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications, DCCN, 22–26 September 2025, Moscow, Russia*. RSCI; 2025. p.20–24.
2. Grebeshkov A.Y., Borovskaya Y.A. Constructing of information-oriented 5g-icn networks. *Vestnik Svyazi*. 2021;11:13–18. (in Russ.) EDN:IDYVMD
3. Rec. ITU-T Y.3075. *Requirements and capabilities of information-centric networking routing and forwarding based on control and user plane separation in IMT-2020*. 2020.
4. Serhane O., Yahyaoui K., Nour B., Mouncla H. A Survey of ICN Content Naming and In-network Caching in 5G and Beyond Networks. *IEEE Internet of Internet of Things*. 2021;8(6):4081–4104. DOI:10.1109/JIOT.2020.3022243. EDN:VOZKTY
5. Navrotskiy Y.Y., Patsei N.V. Naming features of objects and services in information-centric networks. *Proceedings of the IId All-Russian Scientific Conference with International Participation on Information Technologies in Modeling and Management: Approaches, Methods, Solutions, Tolyatti, Russian Federation, 22–24 April 2019*. 2019. p.506–511. (in Russ.) EDN:NICCSU
6. Bala Krishna M. *User-Centric and Information-Centric Networking and Services Access Networks, Storage and Cloud Perspective*. CRC Press, 2019. 310 p. DOI:10.1201/9781315207650
7. Zhang L., Afanasyev A., Burke J., Jacobson V., claffy K.C., Crowley P., et al. Named data networking. *ACM SIGCOMM Computer Communication*. 2014;44(3):66–73. DOI:10.1145/2656877.2656887
8. Bari F., Chowdhury S.R., Ahmed R., Boutaba R., Mathieu B. A survey of naming and routing in information-centric networks. *IEEE Communications Magazine*. 2012;50(12):44–53. DOI:10.1109/MCOM.2012.6384450
9. Xylomenos G., Ververidis C.N., Siris V.A., Fotiou N., Tsilopoulos C., Vasilakos X., Katsaros K. V., Polyzos G.C. A Survey of Information-Centric Networking Research. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2014;16(2):1024–1049. DOI:10.1109/SURV.2013.070813.00063
10. Ahlgren B., Dannewitz C., Imbrenda C., Kutscher D., Ohlman B. A Survey of Information-Centric Networking. *IEEE Communications Magazine*. 2012;50(7):26–36. DOI:10.1109/MCOM.2012.6231276
11. Subharthi P., Jianli P., Raj J. Architectures for the future networks and the next generation internet: a survey. *Computer Communication*. 2011;34(1):1–63. DOI:10.1016/j.comcom.2010.08.001
12. Li M., Wang X, Gao K., Zhang S. A Survey on Information Diffusion in Online Social Networks: Models and Methods. *Information*. 2017;8(4):1–21. DOI:10.3390/info8040118
13. Mattar C., Bou Abdo J.B., Demerjian J.A., Makhoul A. Network Diffusion Algorithms and Simulators in IoT and Space IoT: A Systematic Review. *Sensor and Actuator Networks*. 2025;14(2):1–36. DOI:10.3390/jsan14020027. EDN:QERFOZ
14. Kumar P., Sinha A. Information diffusion modeling and analysis for socially interacting networks. *Social Network Analysis and Mining*. 2021;11(1):11. DOI:10.1007/s13278-020-00719-7. EDN:AZBSFG
15. Blinnikov M.A., Pirmagomedov R.Y. Network gateway for named data networks. *Electrosvyaz*. 2021;5:22–30. DOI:10.34832/ELSV.2021.18.5.002. (in Russ.) EDN:OOIHJJ
16. Blinnikov M.A., Pirmagomedov R.Ya., Molchanov D.A., Kucheryavy E.A. Application of named-data technologies in wireless mesh networks. *Electrosvyaz*. 2019;11:22–28. (in Russ.) EDN:RHQFJM
17. Blinnikov M.A. *Development and Research of Models and Methods for Constructing Wireless Mesh Networks of Named Data*. Ph.D. Thesis. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2022. 23 p. (in Russ.)
18. Baturshina Y.A. *An application for calculating the update rate of the cache content of sensor nodes in information-centric networks*. Patent RF, no. 2025660551, 24.04.2025. (in Russ.) EDN:VYUKGH
19. Baturshina Y.A., Grebeshkov A.Y. *Program of Information -Centric Network modeling*. Patent RF, no. 2025695229, 10.12.2025. (in Russ.) EDN:NPEPPJ

Статья поступила в редакцию 19.12.2025; одобрена после рецензирования 22.01.2026; принята к публикации 06.02.2026


The article was submitted 19.12.2025; approved after reviewing 22.01.2026; accepted for publication 06.02.2026

Информация об авторах:

БАТЫРШИНА
Яна Александровна

аспирант кафедры сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики
 <https://orcid.org/0000-0003-3555-2465>

ГРЕБЕШКОВ
Александр Юрьевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики
 <https://orcid.org/0000-0001-8899-414X>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.